

растворами соединений хрома и циркония с последующей термообработкой для перехода их в тугоплавкие оксиды позволяет повысить температуростойкость материала SiO₂—SiO₂ на 25 %.

В дальнейшей работе планируется продолжить исследования и поиск наиболее эффективных и технологичных режимов нанесения модификаторов, провести исследование прочностных, теплофизических и диэлектрических свойств получаемых материалов.

Библиографический список

1. Пат. 2210555 РФ Способ получения радиотехнического материала / Камалов А. Д., Пронин Б. Ф., Арсланова Н. И., Цыруль Н. П., Волик Н. И., Ступакова Н. П., Тазитдинова Н. В., Янковская Т. В.; заявл. 10.03.03; опубл. 20.08.03.
2. **Торопов, Н. А.** Диаграммы состояния силикатных систем : справочник. Вып. 1. Двойные системы / Н. А.

Сравнительная температуростойкость модифицированных образцов материала SiO₂—SiO₂

Оксид	Содержание оксида, %	Глубина кратера, мм
Хрома	0	3,2
	3	0,4
	9	1,1
Циркония	0	3,4
	5	2,0
	12	1,3

Торопов, В. П. Барзаковский, В. В. Лапин [и др.]. — Л. : Наука, Ленингр. отд., 1969. — 822 с. ■

Получено 19.11.13

© В. А. Дьяконов, Е. С. Лукин, Н. В. Нефедова, Б. Ф. Пронин, Е. Н. Филатов, 2013 г.

Д. т. н. **В. В. Кузин**, д. т. н. **С. Н. Григорьев**, **В. Н. Ермолин**

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

УДК 666.3:536.49

НЕОДНОРОДНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ КЕРАМИКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ. ЧАСТЬ 2. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ*

Приведены результаты комплексного изучения неоднородности напряжений в поверхностном слое керамики на основе диоксида циркония под действием теплового нагружения. Выявлена высокая неоднородность напряжений в структурных элементах керамики. Отмечена необходимость учета неоднородности напряжений при описании механизма износа и разрушения, а также при проектировании изделий из этой керамики для заданных условий эксплуатации.

Ключевые слова: керамика, неоднородность, напряженно-деформированное состояние, поверхностный слой, моделирование, диоксид циркония, проектирование.

ВВЕДЕНИЕ

Иntenсификация теплового режима эксплуатации современных машин и повышение требований к их надежности обуславливает специальные требования к свойствам структурно-неоднородных материалов, из которых изготавливают наиболее нагруженные детали. Эти требования реализуются в основном за счет оптимизации комплекса свойств материалов, обеспечивающего их повышенную сопротивляемость деформированию и разрушению под действием тепловой нагрузки [1, 2]. Несмотря на очевидный прогресс в реализации такого подхода, вероятность внезапных разрушений высокотемпературных элементов машин остается достаточно

высокой [3], что существенно ограничивает перспективу эффективного применения новых материалов, в том числе керамических [4, 5].

В основе этой проблемы находится недостаточная изученность природы формирования термических напряжений, оказывающих существенное влияние на поведение керамических материалов под действием тепловой нагрузки. Наиболее исследованной оказалась взаимосвязь формы и размеров детали, свойств материала, теплового режима и условий теплопередачи с термическими напряжениями I рода [6, 7]. Влиянию разных факторов на термические напряжения II рода, образующиеся в структурных элементах неоднородных материалов и на их границах, уделялось не такое пристальное внимание. Объяснить этот факт можно повышенной сложностью задачи из-за необходимости:

* Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 10 за 2013 г.

– учета структуры неоднородных материалов, которая формируется ее элементами, имеющими разные формы, размеры и свойства;

– рационального выбора модели, при использовании которой можно учесть основные структурные особенности материала;

– разработки специальной методики расчета напряжений в структурных элементах неоднородных материалов [8, 9].

Восполнить существующий пробел в знаниях позволила методика исследования неоднородности напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки, с применением которой изучено влияние сложного механического нагружения [10]. В настоящей работе поставлена цель — оценить неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики из диоксида циркония в результате теплового нагружения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение сформулированной задачи базировалось на численном моделировании деформационных процессов с использованием комплекса моделей [11, 12]. Методика выполнения экспериментов подробно описана в первой части этой работы [10]. Поэтому здесь отметим только наиболее важные положения методики.

Расчетная схема представлена в виде конструкции, состоящей из фрагментов деталей Д1 и Д2, выполненных из керамики и меди соответственно (рис. 1). Фрагмент детали Д1 состоит из трех зерен Z1, Z2 и Z3 эллипсной формы, которые заделаны в матрицу через межзеренную фазу. На внешней стороне зерен, межзеренной фазы и матрицы расположен фрагмент детали Д2. Зерна и матрица детали Д1 выполнены из диоксида циркония ZrO_2 плотностью $\rho = 5,68 \text{ г/см}^3$ с модулем упругости $E = 180 \text{ ГПа}$ и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,2$; межзеренная фаза — из оксида магния MgO плотностью $3,4 \text{ г/см}^3$ с $E = 315 \text{ ГПа}$ и $\mu = 0,18$; деталь Д2 — из меди Cu плотностью $8,9 \text{ г/см}^3$ с $E = 110 \text{ ГПа}$ и $\mu = 0,37$. К свободной поверхности фрагмента детали Д2 прикладывали тепловые потоки Q_1, Q_2, Q_3 и Q_4 , определенное сочетание которых считали комплексом. Каждый комплекс тепловых потоков характеризуется их фиксированными значениями (табл. 1). Эта «нагруженная» конструкция называется «керамика системы $ZrO_2-MgO-ZrO_2-Cu$ ».

Для анализа результатов численных экспериментов использовали контрольные точки (КТ), расположенные в поверхностных слоях зерен Z1 (КТ1 – КТ25), Z2 (КТ26 – КТ51), Z3 (КТ52 – КТ76) и межзеренной фазы, примыкающих к зернам (КТ77 – КТ137)

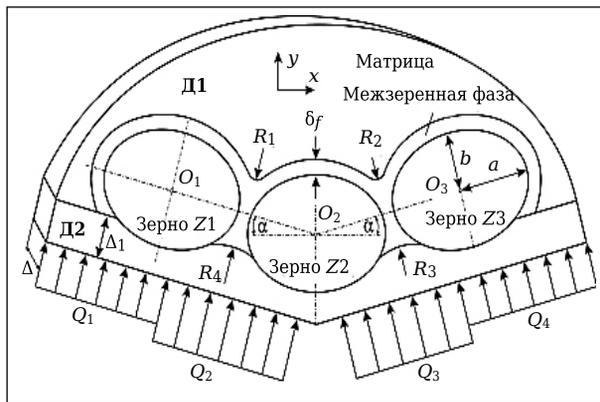


Рис. 1. Расчетная схема

и к матрице (КТ138 – КТ182), а также поверхностном слое матрицы, примыкающем к межзеренной фазе (КТ183 – КТ221) [5]. Расчет интенсивности напряжений в каждой КТ конструкции выполняли в два этапа: первоначально определяли температуры, создаваемые под действием тепловой нагрузки, и затем с использованием этих температур рассчитывали интенсивность напряжений. Коэффициент неоднородности напряжений $K_\Delta = \sigma_{i \max} / \sigma_{i \min}$ (σ_i — интенсивность напряжения) определяли на всех выделенных поверхностях структурных элементов керамики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пример графического отображения полей температур и интенсивности напряжений в поверхностном слое керамики системы $ZrO_2-MgO-ZrO_2-Cu$ под действием комплекса № 1 тепловых потоков (см. табл. 1) представлен на рис. 2, а, б. Качественная оценка результатов численного эксперимента показывает, что под действием четырех тепловых потоков формируется практически симметричное (относительно малой оси центрального зерна Z2) температурное поле простой формы. Температурный режим поверхностного слоя керамики изменяется в диапазоне от 21 до 634 °С, температура заметно понижается с увеличением расстояния от поверхности, к которой приложены тепловые потоки. Наибольшие температуры формируются на внешней поверхности центрального зерна Z2 (КТ26 и КТ49 – КТ51), контактирующей с фрагментом детали Д2.

Неравномерное температурное поле и различие в свойствах структурных элементов керамики и меди определяют сложность напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя керамики системы $ZrO_2-MgO-ZrO_2-Cu$ под действием тепловой нагрузки. В структурных элементах керамики σ_i изменяется от 242 до 2426 МПа. Наибольшие напряжения возникают в слое межзеренной фазы (КТ99 и КТ115), охватывающей центральное зерно Z2; в слое межзеренной фазы (КТ139 и КТ181) между матрицей и зернами Z1 и Z3; в слое матрицы (КТ139 и КТ181). Эти локальные области находятся в непосредственной близости от поверхности керамики или контактируют с поверхностью фрагмента

Таблица 1. Сочетание тепловых потоков в комплексах, Вт/м²

Тепловой поток (нагрузка)	Номер комплекса тепловых потоков	
	1	2
$Q_1 = Q_4$	$2 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$
$Q_2 = Q_3$	$4 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$

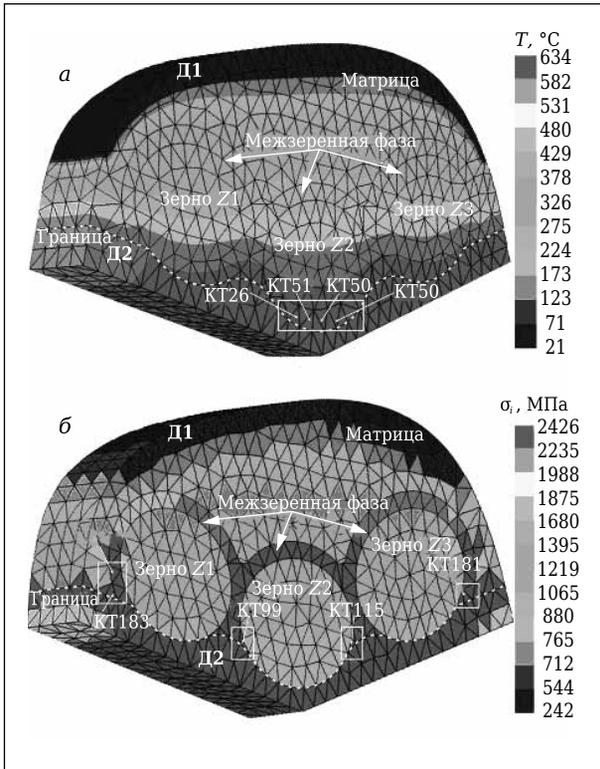


Рис. 2. Поля температур (а) и интенсивности напряжений (б) в керамике системы $ZrO_2-MgO-ZrO_2-Cu$ под действием комплекса № 1 тепловых потоков

детали Д2. В зернах и матрице формируются напряжения с существенно меньшими значениями.

Влияние тепловой нагрузки на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя трех зерен в керамике системы $ZrO_2-MgO-ZrO_2-Cu$ показано на рис. 3. Видно, что напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя керамики весьма неоднородно, причем в зернах Z1 и Z3 (КТ7 и КТ70) зафиксировано образование ярко выраженных концентраторов напряжений. Последовательно проанализируем результаты численных экспериментов в отношении этих структурных элементов керамики, находящейся под действием тепловой нагрузки.

Характер изменения интенсивности напряжений в поверхностном слое зерна Z1 под действием тепловой нагрузки показан на рис. 3, а. Установлено, что увеличение тепловых потоков приводит к повышению интенсивности напряжений σ_i во всех КТ поверхностного слоя зерна Z1. Например, под действием комплекса № 1 тепловых потоков диапазон изменения σ_i составляет 706–1209 МПа, а под действием комплекса № 2 этот показатель находится в диапазоне 940–1613 МПа. Наибольшая интенсивность напряжений зафиксирована в КТ7. Напряженное состояние поверхностного слоя зерна Z1 характеризуется коэффициентом неоднородности $K_{\Delta Z1} = 1,7$.

Характер изменения локальных напряжений в поверхностном слое зерна Z2 в керамике системы $ZrO_2-MgO-ZrO_2-Cu$ под действием тепловой на-

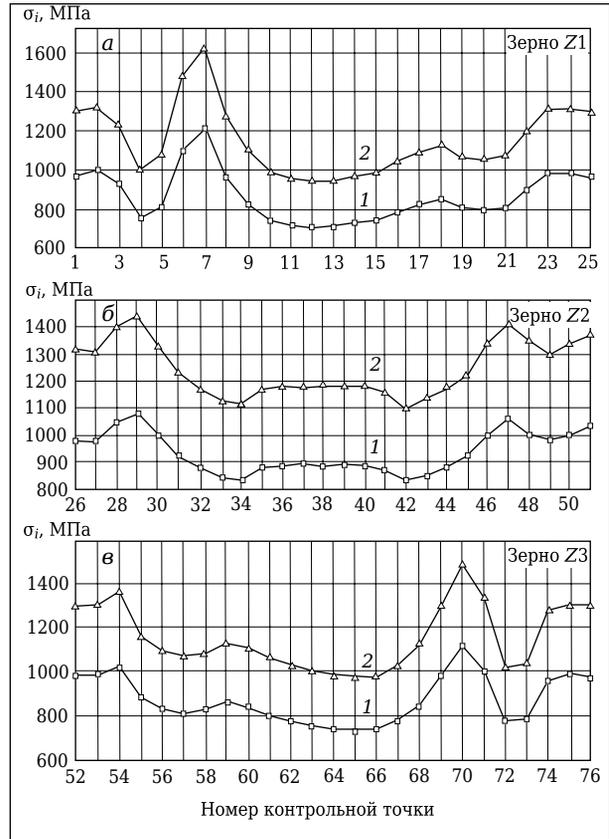


Рис. 3. Влияние тепловой нагрузки на интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхностного слоя зерен Z1 (а), Z2 (б) и Z3 (в) в керамике системы $ZrO_2-MgO-ZrO_2-Cu$. Номера комплексов тепловых потоков указаны на кривых

грузки имеет симметрию относительно его малой оси (рис. 3, б). Наибольшие значения σ_i зафиксированы в КТ29 и КТ47, которые одновременно контактируют с межзеренной фазой и фрагментом детали Д2. Под действием комплекса тепловых потоков № 1 формируются напряжения, интенсивность которых изменяется в диапазоне 828–1071 МПа, под действием комплекса № 2 — от 1105 до 1428 МПа. Коэффициент неоднородности образовавшихся в поверхностном слое зерна Z2 напряжений 1,29.

На рис. 3, в показан характер изменения σ_i в поверхностном слое зерна Z3. Видно, что представленные кривые практически зеркально отражают кривые, полученные для зерна Z1, наибольшие напряжения зафиксированы в КТ70. Значения σ_i в поверхностном слое зерна Z3 на 6–8 % меньше по сравнению с напряжениями в зерне Z1. Наибольшая интенсивность напряжений зафиксирована в КТ70. Неоднородность напряжений в поверхностном слое зерна Z3 характеризуется коэффициентом 1,54.

Характер влияния распределенной тепловой нагрузки на напряженно-деформированное состояние слоев межзеренной фазы, примыкающих к зернам и матрице, показан на рис. 4. Видно, что изменение σ_i в этом случае имеет более сложный характер по сравнению с напряженно-деформированным состоянием поверхностных слоев зерен. Наибольшая интенсивность

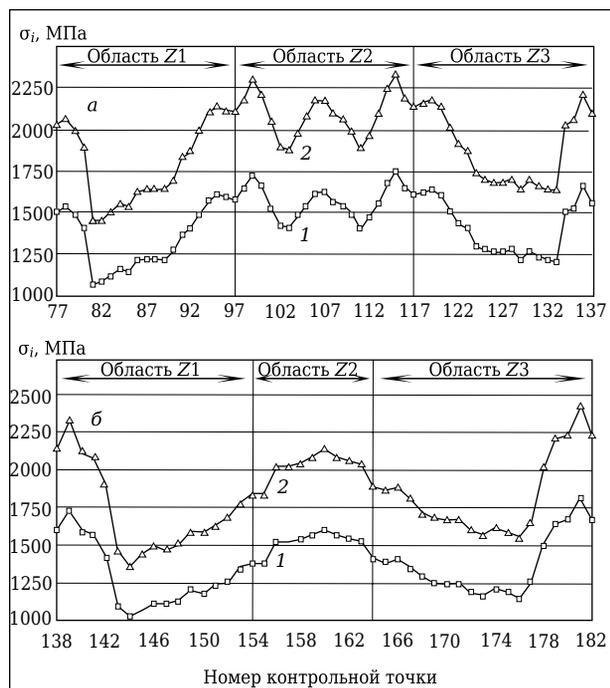


Рис. 4. Влияние тепловой нагрузки на интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхностных слоев межзеренной фазы, примыкающих к зернам (а) и матрице (б), в керамике системы $ZrO_2-MgO-ZrO_2-Cu$. Номера комплексов тепловых потоков указаны на кривых

напряжений в слоях межзеренной фазы выявлена в КТ98, КТ115, КТ139 и КТ181, т. е. на границах контакта зерна, межзеренной фазы и фрагмента детали Д2.

Диапазон изменения σ_i в слоях межзеренной фазы, примыкающих как к зернам, так и к матрице, практически одинаков и под действием комплекса № 1 тепловых потоков составляет 1089–1810 МПа, при нагрузке № 2 — $\sigma_i = 1461 \div 2426$ МПа. Средние значения коэффициентов неоднородности напряжений в слоях межзеренной фазы, прилегающих к зернам и матрице, составляют 1,62 и 1,65 соответственно. Столь значительные изменения напряжений в локальных областях поверхностного слоя керамики способны привести к образованию структурных повреждений, их последующему накоплению и соединению. Этот процесс является первым этапом в разрушении керамики [13, 14].

Результаты детального анализа влияния тепловой нагрузки на неоднородность напряжений в разных фрагментах слоев межзеренной фазы приведены в табл. 2. При выполнении этого исследования в каждом слое межзеренной фазы выделили по три фрагмента, каждый из которых охватывает определенное зерно. Рассмотрим полученные результаты.

Установлено, что наибольшие напряжения от воздействия распределенных температурных нагрузок возникают во фрагментах слоев межзеренной фазы, охватывающих зерно Z2. Например, интенсивность напряжений в них на 30 % выше, чем в слоях межзеренной фазы вокруг зерна Z1, и на 15 %, чем в слоях вокруг зерна Z3. При этом наибольшее значение,

равное 1,56, зафиксировано в слое межзеренной фазы, примыкающем к матрице на участке зерна Z1, а наименьшее значение этого коэффициента 1,16 в слое межзеренной фазы, примыкающем к матрице на участке зерна Z2.

Влияние тепловой нагрузки на σ_i в слое матрицы, примыкающем к межзеренной фазе, показано на рис. 5. Установлено, что значения σ_i в этом структурном элементе керамики изменяются от 431 до 2375 МПа под действием комплекса № 1 тепловых потоков, а под действием комплекса № 2 — от 578 до 3172 МПа.

Обращает на себя внимание факт резкого скачка напряжений в крайних (поверхностных) областях этого слоя и достаточно плавными изменениями напряжений в ее центральной части. Например, на периферийных участках (КТ183 и КТ221) слоя значения интенсивности напряжений превышают 2000 МПа, в его центральной части (КТ199 и КТ295) значения интенсивности напряжений менее 1000 МПа. Этим точкам соответствуют конечные элементы, располагающиеся в области примыкания матрицы к поверхности фрагмента детали Д2. Формирование зон высоких локальных напряжений на поверхности керамики с высокой вероятностью приведет к образованию структурных дефектов в виде несплошностей, их последующему накоплению и соединению именно в этих областях керамической детали.

Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя матрицы характеризуется коэффициентом неоднородности 5,5, что существенно превосходит значения этого параметра для поверхностных слоев зерен и межзеренной фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты численных экспериментов, можно отметить, что напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя керамики на основе диоксида циркония под действием тепловой нагрузки характеризуется высокой неоднородностью. Наибольшие локальные напряжения под действием комплекса тепловых потоков формируются на границе контакта структурных компонентов керамики системы $ZrO_2-MgO-ZrO_2-Cu$ с деталью Д2. Установлено, что интенсивность напряжений в слое ма-

Таблица 2. Неоднородность напряжений в разных участках межзеренной фазы под действием комплекса № 1 тепловых потоков

Слой межзеренной фазы	Область зерна	Номер КТ	Диапазон изменения интенсивности напряжений σ_i , МПа	Коэффициент неоднородности K_Δ
Примыкает к зернам	Z1	77–96	1089–1619	1,48
	Z2	97–116	1416–1764	1,25
	Z3	117–137	1221–1658	1,36
Примыкает к матрице	Z1	138–154	1016–1584	1,56
	Z2	155–164	1377–1604	1,16
	Z3	165–182	1160–1671	1,44

трицы, примыкающем к межзеренной матрице и поверхности фрагмента детали Д2, на 35 % выше, чем в слоях межзеренной фазы, и более чем в 2 раза выше, чем в поверхностных слоях зерен. Коэффициент неоднородности напряжений в поверхностном слое зерен Z1, Z2 и Z3 равен 1,7, 1,29 и 1,54 соответственно. Коэффициент неоднородности напряжений в слоях межзеренной фазы, прилегающих к зернам и матрице, составляет 1,62 и 1,65 соответственно. Напряженное состояние слоя матрицы, примыкающего к межзеренной матрице, характеризуется $K_{\Delta} = 5,5$.

Результаты выполненных исследований позволяют отметить, что при описании механизма износа и разрушения керамических изделий, а также при их проектировании необходимо учитывать появление напряжений, формирующихся в поверхностном слое под действием тепловой нагрузки высоких локальных напряжений и их неоднородности.

Библиографический список

1. **Эванс, А. Г.** Конструкционная керамика : пер. с англ. / А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдон. — М. : Metallurgia, 1980. — 256 с.
2. **Борисенко, В. А.** Прочность и твердость тугоплавких материалов при высоких температурах / В. А. Борисенко. — Киев : Наукова думка, 1984. — 211 с.
3. **Бакунов, В. С.** Прочность и структура керамики / В. С. Бакунов, А. В. Беляков // Огнеупоры и техническая керамика. — 1998. — № 3. — С. 11–15.
4. **Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
- Kuzin, V. V.** Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2011. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.
5. **Григорьев, С. Н.** Перспективы применения инструментов с керамическими режущими пластинами в современной металлообработке / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Стекло и керамика. — 2011. — № 8. — С. 17–22.
6. **Григорьев, С. Н.** Влияние тепловых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из керамики на основе оксида алюминия / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон, А. Батако // Вестник машиностроения. — 2012. — № 5. — С. 68–71.
7. **Григорьев, С. Н.** Влияние свойств керамики на напряженно-деформированное состояние режущей пластины в условиях установившейся теплопроводности / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 4. — С. 76–80.
8. **Панин, В. Е.** Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. В 2 т.



Рис. 5. Влияние тепловой нагрузки на интенсивность напряжений σ_i в КТ поверхностного слоя матрицы, примыкающего к межзеренной фазе, в керамике системы $ZrO_2-MgO-ZrO_2-Cu$. Номера комплексов тепловых потоков указаны на кривых

- Т. 2. / В. Е. Панин, П. В. Макаров, С. Г. Псахье [и др.] (Российская академия наук). — Новосибирск : Наука, 1995. — 320 с.
9. **Кузин, В. В.** Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2013. — № 9. — С. 52–57.
10. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Ч. 1. Влияние сложного механического нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 8. — С. 47–51.
11. **Кузин, В. В.** Микроструктурная модель керамической режущей пластины / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.
12. **Кузин, В. В.** Модель эксплуатации волокна при изготовлении проволоки / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Федоров [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. — 2013. — № 2. — С. 24–28.
13. **Соколкин, Ю. В.** Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел / Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов. — М. : Наука, 1984. — 115 с.
14. **Кузин, В. В.** Методологический подход к повышению работоспособности керамических инструментов / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2006. — № 9. — С. 87–88. ■

(Продолжение следует)

Получено 14.10.13
 © В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
 В. Н. Ермолин, 2013 г.